

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局



(43) 国際公開日  
2004 年 2 月 12 日 (12.02.2004)

PCT

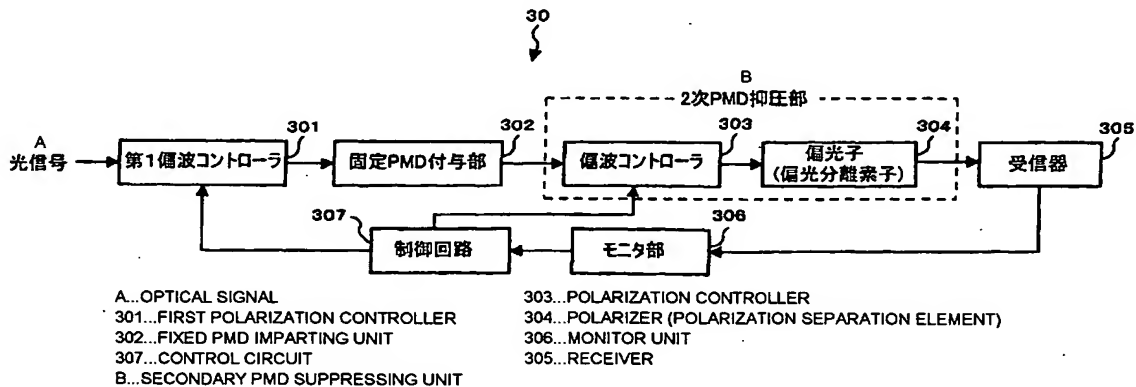
(10) 国際公開番号  
WO 2004/013992 A1

- (51) 国際特許分類: H04B 10/18
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2003/009803
- (22) 国際出願日: 2003 年 8 月 1 日 (01.08.2003)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願2002-226388 2002 年 8 月 2 日 (02.08.2002) JP  
60/454,425 2003 年 3 月 13 日 (13.03.2003) US  
特願2003-190540 2003 年 7 月 2 日 (02.07.2003) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 古河電気工業株式会社 (THE FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD) [JP/JP]; 〒100-8322 東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および  
(75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 池田 和浩 (IKEDA, Kazuhiro) [JP/JP]; 〒100-8322 東京都千代田区丸の内2丁目6番1号 古河電気工業株式会社内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 川和 高穂 (KAWAWA, Takaho); 〒108-0073 東京都港区三田3丁目1-10 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (国内): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(続葉有)

(54) Title: POLARIZATION MODE DISPERSION COMPENSATOR, POLARIZATION MODE DISPERSION COMPENSATING METHOD, AND ITS APPLICATION TO OPTICAL COMMUNICATION SYSTEM

(54) 発明の名称: 偏波モード分散補償装置、偏波モード分散補償方法およびその光通信システムへの適用



(57) Abstract: A polarization mode dispersion compensator characterized by comprising: a compensating unit that includes a first polarization controller for subjecting a light propagated through an optical transmission path to polarization conversion and a group delay time difference imparting portion for imparting a group delay time difference to the light polarization-converted by the first polarization controller and is adapted to compensate the polarization mode dispersion imparted to the light in the propagation through the optical transmission path, a second polarization controller for subjecting the compensated light to polarization conversion so that the light may be a first linearly polarized light, a polarization separating unit for separating the light polarization-converted by the second polarization controller into the first linearly polarized light and a second linearly polarized light polarized orthogonally to the linear polarization of the first linearly polarized light, a light intensity measuring unit for measuring the intensity of the separated second linearly polarized light, and a control unit for controlling the compensating unit and the second polarization controller so that the intensity of the measured second linearly polarized light may be minimized.

(57) 要約: 光伝送路を伝搬してきた光に偏光変換を施す第1の偏波コントローラ及び前記第1の偏波コントローラによって偏光変換された光に群遅延時間差を付与する群遅延時間差付与部を含み、前記光伝送路の伝搬過程で前記光に付与された偏波モード分散を補償するための補償部と、前記補償された光に、その偏光状態が一の直線偏光となるように偏光変換を施す第2の偏波コントローラと、前記第2の偏波コントローラによって偏光変換が施された光を、前記一の直線偏光及びこの一の直線偏光に直交する他の直線偏光に分離する偏光分離

(続葉有)



(84) 指定国 (広域): ARIPO 特許 (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア特許 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ特許 (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IT, LU, MC, NL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI 特許 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告書

2 文字コード及び他の略語については、定期発行される各 *PCT* ガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

## 明細書

偏波モード分散補償装置、偏波モード分散補償方法およびその光通信システムへの適用

### 技術分野

本発明は、光信号により情報伝送を行う光通信の技術分野に関し、特に、光信号の伝送路で発生する偏波モード分散を補償する機能を具備する偏波モード分散補償装置、偏波モード分散補償方法、および、その光通信システムへの適用に関するものである。

### 背景技術

近年、光通信分野においては伝送情報の大容量化、高速化が要請され、そのためにWDM (Wavelength Division Multiplexing) 等の種々の要素技術が研究されている。このように高速かつ大容量の光通信を行う場合、従来はあまり問題とならなかった偏波モード分散 (PMD : Polarization Mode Dispersion) が光信号の伝送特性を制限する重要なパラメータとして注目されるようになった。そこで、PMDの影響を補償するためのPMD補償装置の検討が進められている。

上記PMD補償装置に関しては多数の提案がなされており、例えば、特開平11-196046号公報、特表2000-507430号公報、および特開2000-31903号公報に開示されている。

特開平11-196046号公報によれば、伝送路を伝搬してきた光信号は、主偏光 (Principal States of Polarization : P S P) と呼ばれる2つの直交偏光成分に分離している。同公報が開示する偏波モード分散補償装置は、これら2つの直交偏光成分を、群遅延時間差 (Differential Group Delay : D G D) 付与部の直交する2つの固有偏光 (Eigen States of Polarization : E S P)

に偏光変換する偏波コントローラと、伝搬してきた光信号の偏波モード分散による波形歪みを検出する検出手段と、この検出手段からの制御信号で偏波コントローラの運転を制御する制御装置とを備えている。

特表 2000-507430 号公報が開示する偏波モード分散補償装置においては、受信器の前に群遅延時間差付与部が配置されている。群遅延時間差付与部の群遅延時間差は固定量であって、この群遅延時間差付与部よりも発信器側の伝送路と偏波コントローラとからなる光路で発生する偏波モード分散に比べて大きい。そして、この偏波モード分散補償装置では、群遅延時間差付与部から出射した光の偏光度 (Degree of Polarization : DOP) を検出して、この偏光度が最大値を示すように偏波コントローラが制御される。このような制御によれば、送信器と受信器との間を延び、伝送路、偏波コントローラ及び群遅延時間差付与部を含む光路の主偏光のうち的一方が、送信器から出射している光の偏光状態 (State of Polarization : SOP) に一致させられる。

特開 2000-31903 号公報が開示する偏波モード分散補償装置は、偏光度が制御量である点は特表 2000-507430 号公報の場合と同じである。その一方で、この偏波モード分散補償装置では、偏光度の検出手段として、偏光解析器や、特表 2000-507430 号公報にも開示されているように、偏波コントローラ及び偏光子が使用されている。

なお、上記した従来技術は、いずれも 1 次偏波モード分散の補償については有効であるものの、実際の伝送路に適用した場合には 2 次偏波モード分散の補償が問題となることが知られている。この 2 次偏波モード分散を補償するための手段は、例えば、OFC2002, WI4, Technical Digest p. 236 (以下、文献 1 という) に記載されている。

具体的には、文献 1 には、特表 2000-507430 号公報に記載されているような偏波モード分散補償装置の後段に、更に、偏波コントローラ及び偏

光子が配置されている。文献1によれば、この後段に配置された偏光子からの出力を最大化することによって偏波モード分散補償装置からの出力偏光を直線偏光にあわせると共に、直線偏光以外の偏光成分を除去する。こうすることによって、2次偏波モード分散に起因する成分の1つである非偏光成分（デポラライズ成分）が除去される。

しかしながら、上記した特開平11-196046号公報、特表2000-507430号公報、および特開2000-31903号公報が開示する偏波モード分散補償装置は、いずれも検出手段の構成が複雑であり、その結果として、非常に高価であるという問題がある。

具体的には、特開平11-196046号公報においては、強度変調されている信号光の光強度を直接測定し、電気信号に変換した後その強度変調周波数のうちの一部を電気フィルタで切り出してその強度を制御量としているが、非常に高い周波数成分の変調成分を検知して回路処理しなければならず、一般にそのような電気回路系は複雑で高価である。

特表2000-507430においては、偏光度の検出手段として、偏波コントローラ、偏光子、偏光子前段のパワーモニタ、偏光子後段のパワーモニタ、および、偏光子前段のパワーと偏光子後段のパワーとを比較して偏光度を演算する演算回路からなり構成が複雑である。また、このような偏光度の演算には時間がかかり、その結果、制御にも時間がかかる。

特開2000-31903号においては、偏光解析器自体が高価であり、また、偏光度の演算には時間がかかる。

そして、これら複雑な構成を有する偏波モード分散補償装置に、更に、文献1に記載された2次偏波モード分散の補償手段を用いると、構成がより一層複雑化して高価になることは免れない。

その一方、上記した従来技術の偏波モード分散補償装置は、単一波長についてのみ有効に機能する。そのため、波長分割多重通信システムに上記した偏波モード分散補償装置を適用する場合、チャンネル毎に偏波モード分散補償装置が配置される。このように多数の偏波モード分散補償装置が一括して配置されることから、偏波モード分散補償装置の普及・実用化のためには、構成の単純化及び低価格化が望まれている。

更に、偏波モード分散(Polarization Mode Dispersion: PMD)は40Gbps以上のビットレートの光通信システムにおいては主要な劣化要因である。また、比較的古いファイバを用いた10Gbpsシステムにおいても伝送路の持つPMD量によっては大きな問題となりえる(参考文献[1](F. Bruyere, Optical fiber Tech., 2, pp269-280, 1996))。そのため、PMD補償について多くの研究がなされてきている(参考文献[2](H. Ooi et al., OFC99, WE5-1, p86, 1999)、[3](T. Takahashi et al., Electron. Lett., 30(4), PP. 348-349, 1994)、[4](F. Roy et al., OFC' 99, TuS4-1, p275, 1999)、[5](C. Francia et al., Photon. Technol. Lett., 10(12), p1739, 1998)、[6](J. Poirrier et al., OFC2002, W14, p236, 2002))が、これらの技術は単一波長、単一チャンネルに対するものであって、波長分割多重を用いた多波長、多チャンネルのシステムにおいて実際に適用されるためには、安価な構成でなければならない。

従って、本発明は上述した従来の問題を解決するためになされたものであり、簡単な構成で検出手段を構成でき、かつ、1次偏波モード分散および2次偏波モード分散を補償できる安価な偏波モード分散補償装置及、偏波モード分散補償方法、および、その光通信システムへの適用を提供することを目的としている。

#### 発明の開示

本発明の偏波モード分散補償装置の1つの態様は、光伝送路を伝搬してきた光に偏光変換を施す第1の偏波コントローラ及び前記第1の偏波コントローラ

によって偏光変換された光に群遅延時間差を付与する群遅延時間差付与部を含み、前記光伝送路の伝搬過程に前記光に付与された偏波モード分散を補償するための補償部と、前記補償された光に、その偏光状態が一の直線偏光となるように偏光変換を施す第2の偏波コントローラと、前記第2の偏波コントローラによって偏光変換が施された光を、前記一の直線偏光及びこの一の直線偏光に直交する他の直線偏光に分離する偏光分離部と、前記分離された他の直線偏光の強度を測定する光強度測定部と、前記測定された他の直線偏光の強度を最小化するように前記補償部及び前記第2の偏波コントローラを制御する制御部とを備えたことを特徴とする偏波モード分散補償装置である。

また、本発明の偏波モード分散補償装置の他の1つの態様は、光伝送路を伝搬してきた光に偏光変換を施してから群遅延時間差を付与して、前記光伝送路の伝搬過程で前記光に付与された偏波モード分散を補償する補償工程と、前記補償工程にて補償された光に、その偏光状態が一の直線偏光となるように偏光変換を施す偏光変換工程と、前記偏光変換工程にて偏光変換が施された光を、前記一の直線偏光及びこの一の直線偏光に直交する他の直線偏光に分離する偏光分離工程と、前記偏光分離工程にて分離された他の直線偏光の強度を測定する測定工程と、前記測定工程にて測定された他の直線偏光の強度を最小化するように前記補償工程及び前記偏光変換工程を制御する制御工程とを備えたことを特徴とする偏波モード分散補償方法である。

更に、本発明の偏波モード分散補償装置の他の1つの態様は、伝送路を伝搬する光信号に発生する偏波モード分散を補償する偏波モード分散補償装置であって、前記伝送路を経由して入射された光信号に偏光変換を施す偏波コントローラと、前記偏波コントローラによって偏光変換された光信号に固定量のPMD（偏波モード分散）を付与する固定PMD付与部と、前記固定PMD付与部から出力された光信号の状態を監視するモニタ手段と、前記モニタ手段からのフィードバック信号に基づき前記偏波コントローラを制御する制御手段とを備え、前記固定PMD付与部が付与する前記固定量のPMDは、固定の1次PM

Dと固定の2次PMDとからなることを特徴とする偏波モード分散補償装置である。

この発明によれば、伝送路を経由して伝搬された光信号は偏波コントローラにより偏光変換された後、固定PMD付与部により固定の1次PMDと固定の2次PMDを付与される。そして、固定PMD付与部から出力された光信号の状態がモニタ手段で監視され、そのフィードバック信号に基づき制御手段により偏波コントローラが制御される。その結果、光信号のPMDの影響は適切に補償され、構成及び制御を複雑にすることなく、固定PMD付与部の作用により1次PMDに加えて2次PMDを十分に抑圧することが可能となる。

また、この発明の偏波モード分散補償装置の他の1つの態様は、伝送路を伝搬する光信号に発生する偏波モード分散を補償する偏波モード分散補償装置であって、前記伝送路を経由して入射された光信号に偏光変換を施す第1の偏波コントローラと、前記第1の偏波コントローラによって偏光変換された光信号に固定の1次PMDのみを付与する第1の固定PMD付与部と、前記第1の固定PMD付与部から出力された光信号に偏光変換を施す第2の偏波コントローラと、前記第2の偏波コントローラによって偏光変換された光信号に固定の2次PMDのみを付与する第2の固定PMD付与部と、前記第2の固定PMD付与部から出力された光信号の状態を監視するモニタ手段と、前記モニタ手段からのフィードバック信号に基づき前記第1の偏波コントローラ及び前記第2の偏波コントローラを制御する制御手段とを備えることを特徴とする偏波モード分散補償装置である。

この発明によれば、伝送路を経由して伝搬された光信号は第1の偏波コントローラにより偏光変換された後、第1の固定PMD付与部により固定の1次PMDを付与される。続いて、第1のPMD付与部から出力された光信号は第2の偏波コントローラにより偏光変換された後、第2の固定PMD付与部により固定の2次PMDを付与される。そして、第2の固定PMD付与部から出力さ



れた光信号の偏波状態がモニタ手段で監視され、そのフィードバック信号に基づき制御手段により第1の偏波コントローラと第2の偏波コントローラが制御される。その結果、同様に、光信号のPMDの影響は適切に補償し得るとともに、調整の自由度をより高めた上で2次PMDを十分に抑圧することが可能となる。

この発明の偏波モード分散補償装置の他の1つの態様は、前記固定PMD付与部を、固有偏光軸に相対角度をつけて連結した複数の偏波保持光ファイバ又は1軸性複屈折結晶から構成してもよい。

また、この発明の偏波モード分散補償装置の他の1つの態様は、前記第1の固定PMD付与部を、1つの偏波保持光ファイバ又は1軸性複屈折結晶から構成してもよい。

また、この発明の偏波モード分散補償装置の他の1つの態様は、前記第2の固定PMD付与部を、固有偏光軸に相対角度をつけて連結した3つ以上の偏波保持光ファイバ又は1軸性複屈折結晶から構成してもよい。

このように、本発明によれば、上述したような各PMD付与部を構成する場合、一般的で安価な部材を採用することができる。

また、この発明の偏波モード分散補償装置においては、前記第2の固定PMD付与部を、固有偏光軸に相対角度をつけて連結した3つ以上の偏波保持光ファイバ又は1軸性複屈折結晶から構成した場合、前記第2の固定PMD付与部の連結部のいずれかに固定の偏光変換器を配置し、当該偏光変換器に前記第2の固定PMD付与部の1次PMDを0とするような偏光変換機能を持たせてよい。

また、この発明の偏波モード分散補償装置においては、前記第1の固定PMD付与部又は前記第2の固定PMD付与部の温度を調整する温度調整手段を更に備える構成としてもよい。

また、この発明の偏波モード分散補償装置においては、1つの偏波コントロ

一ラと1つの偏光子又は偏光分離素子からなる2次PMD抑圧部を後段に配置してもよい。

#### 図面の簡単な説明

図1は、本発明の一実施例の偏波モード分散補償装置の概略構成図である。

図2は、図1の補償装置の群遅延時間差付与部の変形例である。

図3は、図1の補償装置の群遅延時間差付与部の他の変形例である。

図4は、偏光度の高い光の説明図である。

図5は、偏光度の低い光の説明図である。

図6は、図1の補償装置の補償部による偏波モード分散の補償方法の説明図である。

図7は、図1の補償装置の補償部の変形例による偏波モード分散の他の補償方法の説明図である。

図8は、本発明を適用した第1の実施形態に係るPMD補償装置の構成を示す図である。

図9は、第1の実施形態において、PMD補償装置の固定PMD付与部におけるPMDベクトルによる補償原理について説明する図である。

図10は、第1の実施形態において、固定の2次PMD成分を備えたPMD付与部の具体例を示す図である。

図11は、本発明を適用した第2の実施形態に係るPMD補償装置の構成を示す図である。

図12は、第2の実施形態において、固定SOPMD付与部の第1の構成例を示す図である。

図13は、第2の実施形態において、固定SOPMD付与部の第2の構成例を示す図である。

図14は、本発明の変形例に係るPMD補償装置の構成を示す図である。

図15は、本発明の1つの実施例に従った光通信システムを模式的に示した図である。

図16は、様々な伝送路DGDに対して、異なるDGD付与部を備えたPMDC

によって補償されたDOPおよびQ値を図示したものである。

図17は、2次PMDの存在する場合の様々な伝送路DGDに対して、異なるDGD付与部を備えたPMDCによって補償されたQ値を図示したものである。

#### 発明を実施するための最良の形態

図1は本発明の偏波モード分散補償装置（以下、補償装置といい、符号10を付す）の1つの態様を示している。補償装置10は、例えば、一对の送信器と受信器との間を延びる光伝送路の受信器側に介挿して使用される。より詳しくは、補償装置10は、送信器が生成し、光伝送路としての光ファイバ12を伝搬した光を受光する。そして、補償装置10は、光ファイバ12を伝搬することによってその受光した光に付与された偏波モード分散を補償して、補償された光を受信器まで延びる光ファイバ14に出射する。したがって、受信器は、補償装置10を介することによって、光ファイバ12の有する偏波モード分散が補償された光を受光することができる。

補償装置10は、補償部16を備えており、この補償部16は、光ファイバ12に光学的に結合された第1の偏波コントローラ18と、この偏波コントローラ18に光学的に結合された群遅延時間差付与部（以下、群遅延時間差付与部といい、符号20を付す）とからなる。

第1の偏波コントローラ18は、公知のものを使用することができ、光ファイバ12を伝搬してきた光が光ファイバ12から出射したときの偏光状態、換言すれば、偏波コントローラ18に入射するときの偏光状態を、所望の偏光状態の光に偏光変換して出射させるものであれば何であつても良い。

群遅延時間差付与部20は、偏波保持ファイバからなる。偏波保持ファイバは、互いに直交する2つの固有偏光を有し、各固有偏光は、偏波保持ファイバの進相軸または遅相軸に平行な直線偏光である。そして、群遅延時間差付与部

20においては、2つの固有偏光間には、進相軸及び遅相軸の屈折率並びに偏波保持ファイバの長さに応じた群遅延時間差が付与される。

なお、群遅延時間差付与部としては、偏波保持ファイバ（PMF）の他、複屈折結晶を用いることができる。ここにおいて、偏波保持ファイバ及び複屈折結晶は、固有偏光間に付与する群遅延時間差が固定量である群遅延時間差付与部として用いられる。

より具体的には、偏波保持ファイバとしては、パンダ（PANDA）ファイバ、ボータイ（bow-tie）ファイバ、および楕円ファイバ等を挙げることができる。また、複屈折結晶としては、一軸性複屈折結晶であるルチル（ $\text{TiO}_2$ ）、リチウムナイオベート（ $\text{LiNbO}_3$ ）、方解石（ $\text{CaCO}_3$ ）、バリウムポーレート（ $\text{BaB}_2\text{O}_4$ ）、イットリウムオルトバナデート（ $\text{YVO}_4$ ）等を挙げることができる。

更に、群遅延時間差付与部として、例えば、図2及び図3にそれぞれ示した群遅延時間差付与部22及び群遅延時間差付与部24を用いることができる。これら群遅延時間差付与部22、24は、付与する群遅延時間差が可変量になる。

具体的には、図2に示した群遅延時間差付与部22は、2つの偏光分離素子26、28間を延びる一方の光路が遅延光路30であって、この遅延光路30の光路長は、可動鏡32が図中矢印で示したように移動することによって可変である。なお、2つの偏光分離素子26、28間を延びるもう一方の光路には、必要に応じて、可変減衰器が介挿される。

また、図3に示した群遅延時間差付与部24は、2つの偏波保持ファイバ34、36の間に偏光回転子38が介挿されており、この偏光回転子38の回転角が可変である。

群遅延時間差付与部 20 の偏波保持ファイバの先端は、第 2 の偏波コントローラ 40 と光学的に結合されている。第 2 の偏波コントローラ 40 としては公知のものを使用することができ、任意の偏光状態を有する光を、特定の方位を有する直線偏光として出射させるものであれば何であってもよい。

第 2 の偏波コントローラ 40 には、偏光ビームスプリッタからなる偏光分離部 42 が光学的に結合されている。偏光分離部 42 は、入射した光を、互いに直交する 2 つの直線偏光に分離して出射させる。ここで、第 2 の偏波コントローラ 40 は、群遅延時間差付与部 20 から出射した光が、これら 2 つの直線偏光のうち的一方に平行な直線偏光となるよう偏光変換を施す。

なお、偏光分離部 42 は、プリズムが組み合わされた偏光ビームスプリッタの外、例えば、複屈折結晶等を用いることができる。具体的には、偏光分離部 42 に用いられる複屈折結晶としては、一軸性複屈折結晶であるルチル ( $\text{TiO}_2$ ) リチウムナイオベート ( $\text{LiNbO}_3$ )、方解石 ( $\text{CaCO}_3$ )、バリウムボーレート ( $\text{BaB}_2\text{O}_4$ )、イットリウムオルトバナデート ( $\text{YVO}_4$ ) 等を挙げることができる。

偏光分離部 42 には、偏光分離部 42 から出射する一方の直線偏光が入射する光ファイバ 14 の基端部、および、他方の直線偏光が入射する光ファイバ 44 の基端部が、それぞれ光学的に結合されている。なお、第 2 の偏波コントローラ 40 からの直線偏光が光ファイバ 14 の基端部に入射するように、偏光分離部 42 に対して光ファイバ 14 は配置されている。

光ファイバ 14 は受信器へ延びており、光ファイバ 44 は光強度測定部 46 へ延びている。光強度測定部 46 は、光ファイバ 44 の先端と光学的に結合されており、光ファイバ 44 の先端から出射する光の強度を連続的に測定する。そして、この測定結果は、光強度測定部 46 と電氣的に接続された制御部 48 に入力される。

制御部 48 は、補償部 16 及び第 2 の偏波コントローラ 40 にそれぞれ電氣的に接続されており、光強度測定部 46 によって測定された光の強度に基づいて、補償部 16 及び第 2 の偏波コントローラ 40 を制御する。

具体的には、制御部 48 は、光強度測定部 46 によって測定される光の強度が最小化されるように、第 1 の偏波コントローラ 18 の偏光変換及び第 2 の偏波コントローラ 40 の偏光変換を制御する。なお、群遅延時間差が可変である群遅延時間差付与部 22, 24 を群遅延時間差付与部 20 の代わりに用いた場合には、制御部 48 は、これら第 1 及び第 2 の偏波コントローラ 18, 40 の偏光変換に加えて、更に、群遅延時間差付与部 22, 24 が付与する群遅延時間差を、光強度測定部 46 によって測定される光の強度が最小となるように制御してもよい。

以下、補償装置 10 の動作について説明する。

光ファイバ 12 を伝搬してきた光は、互いに直交する 2 つの主偏光からなり、これら主偏光の間には偏波モード分散が付与されている。なお、主偏光及び主偏光間の偏波モード分散は、例えば光ファイバ 12 に付与される応力等に起因する光ファイバ 12 の状態変化に伴って、刻々と変化する。

補償装置 10 においては、制御部 48 が、光強度測定部 46 にて測定される光強度が最小化されるように、補償部 16 及び第 2 の偏波コントローラ 40 を後述する補償方法に則して制御する。この制御によって、光ファイバ 12 の偏波モード分散が補償される。

ここで、光強度測定部 46 にて測定される光強度を最小化することは、補償部 16 の制御という観点からみれば、補償部 16 に入射した光の偏波モード分散を補償して、偏光度の高い光として出射させることである。偏光度の高い光は、第 2 の偏波コントローラ 40 によって偏光度の高い直線偏光に偏光変換さ

れるので、光強度測定部 46 で測定される直線偏光の強度が最小となる。

かくして、補償装置 10 では、第 2 の偏波コントローラ 40、偏光分離部 42 及び光強度測定部 46 が、フィードバック制御における検出手段としての機能を果たしている。補償装置 10 では、第 2 の偏波コントローラ 40 から出射した光を、光タップ等を用いて単に所定の強度比にて分岐するのではなく、偏光分離部 42 によって、理想的にはゼロとなるべき光の強度を制御量として分岐することによって、このように簡単な構成で検出手段を実現している。その結果、補償装置 10 では検出手段として、構成が複雑な、偏光解析器や、強度変調スペクトルを解析するための電気回路等を使用する必要がない。そして、補償装置 10 は、構成が簡単であるがゆえに、応答速度が速く、刻々と変換する偏波モード分散にも追従することができる。

また、補償装置 10 においては、偏光分離部 42 によって非偏光成分が除去されるので、光ファイバ 12 の 1 次偏波モード分散のみならず、2 次偏波モード分散についても補償される。

一方、補償装置 10 においては、第 2 の偏波コントローラ 40 を制御して、光ファイバ 14 に入射する直線偏光の光強度を最大にするということは、補償部 16 の制御を行うにあたって必要不可欠である。そこで、補償装置 10 では、この第 2 の偏波コントローラ 40 の制御のための制御量を、補償部 16 の制御量と共通にして、補償装置 10 の構成の単純化を図っている。

なお、偏光度の高い光とは、付与されている偏波モード分散の小さい光、もしくは、偏波モード分散が十分補償された光であって、そのスペクトル内に含まれる互いに波長の異なる光の偏光状態が揃っている光のことをいう。このことを、図 4 (a) に例示したように、中心波長  $\lambda_0$  のスペクトル形状を有し、中心波長  $\lambda_0$  の光の偏光状態が図 4 (b) に示したように直線偏光の場合について説明する。この場合、光の偏光度が高ければ高いほど、スペクトルに含まれる

中心波長 $\lambda_0$ 以外の波長 $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ の光の偏光状態が、図4 (c), (d) に示したように、中心波長 $\lambda_0$ の光と同じ直線偏光に近くなる。

このように偏光度の高い光が、第2の偏波コントローラ40によって直線偏光に偏光変換された場合、スペクトル内で偏光状態がほぼ直線偏光に揃えられるので、偏光分離部42にて光ファイバ44へ分岐される直線偏光成分はほとんど発生せず、光強度測定部46で測定される光の強度は小さくなる。

これに対して、偏光度の低い光は、付与されている偏波モード分散の大きい光、もしくは、偏波モード分散が十分補償されていない光であって、中心波長 $\lambda_0$ の光の偏光状態が直線偏光のときには(図5 (a), (b) 参照)、スペクトルに含まれる中心波長 $\lambda_0$ 以外の波長 $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$ の光の偏光状態が、中心波長 $\lambda_0$ の光とは異なる例えば楕円偏光となる(図5 (c), (d) 参照)。

このような偏光度の低い光が第2の偏波コントローラ40によって直線偏光に偏光変換された場合、スペクトル内で偏光状態がばらつくので、偏光分離部42にて光ファイバ44へ分岐される直線偏光成分が発生し、光強度測定部46で測定される光の強度は大きくなる。

以下では、補償部16がそこに入射した光の偏波モード分散を補償する方法を、直交する3つの基底がストークスパラメータ $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$ であるストークス空間を用いて説明する。

ストークス空間においては、図6に例示したように、送信器からの光が光ファイバ12に入射したときの偏光状態はベクトル $S_{in}$ で表される。そして、光ファイバ12の偏波モード分散はベクトル $\Omega t$ で表される。また、群遅延時間差付与部20が2つの固有偏光間に付与する群遅延時間差はベクトル $\Omega c$ で表され、偏波コントローラ18の偏光変換は変換行列 $T$ で表される。



制御部 48 は、ベクトル  $\Omega_c$  を変換行列  $T$  によって変換して得られたベクトル  $\Omega_c \cdot T$  と、ベクトル  $\Omega_t$  との和が、ベクトル  $S_{in}$  と同じ方向を向くように、第 1 の偏波コントローラ 18 の偏光変換を制御する。

この制御によれば、送信器からの光が光ファイバ 12 に入射したときの偏光状態に、光ファイバ 12 及び補償部 16 からなる光路の互いに偏光状態の直交する主偏光の一方が合わせられている。偏波モード分散は互いに直交する 2 つの主偏光間に付与されるので、一方の主偏光に一致した光には偏波モード分散は発生しない。したがって、この制御によって、光ファイバ 12 の偏波モード分散が補償される。

なお、幾何的な考察によれば、ベクトル  $\Omega_c \cdot T$  と、ベクトル  $\Omega_t$  との和が、ベクトル  $S_{in}$  と同じ方向を向くことを常に可能とするために、ベクトル  $\Omega_t$  が光ファイバ 12 の状態に応じてあらゆる方向をとりうることを考慮して、ベクトル  $\Omega_c$  の大きさはベクトル  $\Omega_t$  よりも大きくなるよう選択されるべきである。ところが、伝送路たる光ファイバは敷設状態の変化、例えば、温度変動・側圧変動により PMD 量が増加し、それはある確率分布を持つことが知られている。その確率的に分布する PMD 量に対して 2 次 PMD も考慮した最適な群遅延時間差付与部 20 の群遅延時間差については後で述べる。ここで、ベクトル  $\Omega_c$  の大きさは群遅延時間差付与部 20 の群遅延時間差に対応した固定量である。

また、補償部 16 が、群遅延時間差付与部 20 の代わりに、群遅延時間差が可変である群遅延時間差付与部 22 又は群遅延時間差付与部 24 を備えている場合には、図 6 を用いて説明した補償方法は勿論のこと、これとは別に、以下の補償方法を採用することができる。

すなわち、ベクトル  $\Omega_c$  の大きさが可変量であって、図 7 に例示したように、制御部 48 は、ベクトル  $\Omega_c$  の長さを調整してベクトル  $\Omega_c'$  とし、ベクトル

$\Omega_c' \cdot T$ とベクトル $\Omega_t$ との和が0となるように第1の偏波コントローラ18の偏光変換及び群遅延時間差付与部22(24)の群遅延時間差を制御する。

この制御によれば、群遅延時間差付与部22(24)の2つの固有偏光のうち遅い固有偏光が光ファイバ12の2つの主偏光のうち速い主偏光に、群遅延時間差付与部の速い固有偏光が光ファイバ12の遅い主偏光にそれぞれ一致させられるとともに、群遅延時間差付与部22(24)の群遅延時間差が、光ファイバ12の主偏光間の偏波モード分散に一致させられている。すなわち、補償部16は、光ファイバ12とは逆の偏波モード分散を有するように制御され、この制御によって、光ファイバ12の偏波モード分散が補償される。

更に、本発明の他の態様を図面に基づいて説明する。ここでは、光信号の伝送路において一对の送信器と受信器の間の受信機側に介挿して使用されるPMD補償装置に対して本発明を適用した2つの実施形態について説明する。

図8は、本発明を適用した第1の実施形態に係るPMD補償装置10の構成を示す図である。図8に示すように第1の実施形態では、偏波コントローラ101と、固定PMD付与部102と、受信器103と、モニタ部104と、制御回路105とを含んでPMD補償装置10が構成されている。

図8に示すPMD補償装置10には、外部から光ファイバ等からなる伝送路を経由して光信号が入射される。このとき、PMD補償装置10に入射される光信号は、伝送路中で2つの直交する偏波モード間にDGDが生じること(及びその周波数分散)により所定のPMD量を有する状態になっている。

図8の構成において、偏波コントローラ101は、光信号の伝送路と光学的に結合され、PMD補償装置10に入射される光信号に対して後述のようにモニタ部104からのフィードバック信号に対応して制御回路105から出力された制御信号に基づき適正な偏光変換制御を施して所望の偏光状態の光信号を出力する。

固定PMD付与部102は、偏波コントローラ101から出力された光信号に固定量のPMDを付与する素子である。第1の実施形態では、固定PMD付与部102が1次PMDの成分に加えて2次PMDの成分を備え、1次PMDと2次PMDの双方を補償可能に構成したことを特徴としている。なお、固定PMD付与部102の具体的な構成及び動作については後述する。

本発明の受信手段としての受信器103は、固定PMD付与部102から出力された光信号を受光し、デジタル信号を抽出する。また、本発明のモニタ手段としてのモニタ部104は、受信器103の動作に基づき光信号のPMDの状態を監視し、監視結果に対応するフィードバック信号を出力する。

なお、図8の例では、モニタ部104は、例えば受信器103におけるエラー信号などの動作状態を判別してPMDの状態を監視する場合を示しているが、固定PMD付与部102から出力された光信号を分岐し、分岐された光信号に基づいてPMDの状態を監視する構成であってもよい。

本発明の制御手段としての制御回路105は、モニタ部104から出力されたフィードバック信号を受け、このフィードバック信号に応じた制御信号を偏波コントローラ101に供給する。よって、光信号のPMDにおける状態の変動はフィードバック信号に変化を生じさせ、それを速やかに偏波コントローラ101に対する制御状態に反映させることができる。

次に、図9Aおよび図9Bを用いて固定PMD付与部102におけるPMDベクトルによる補償原理について説明する。図9Aに示すように、光信号を伝送する伝送路のPMD特性は、1次PMDベクトル $\Omega T$ と2次PMDベクトル $\Omega T'$ とを用いて表すことができる。なお、図9Aにおいて、1次PMDベクトルと2次PMDベクトルは直交するものとして説明を行う。実際には、両者には平行な成分も存在するが、これらは伝送特性に与える影響が小さいのに対し、直交成分が伝送特性に大きな影響を与えるので、本実施形態に係るPMD補償装置10では直交成分を対象として扱い、平行成分は省略して扱うものと

する。

図9 Aに示すように、固定PMD付与部102が固定の1次PMDベクトル $\Omega C$ の成分のみを備えている場合、PMD補償装置10は系全体のPMDベクトル $\Omega F$ の方向を伝送路への入力信号光の偏光状態 $S_{in}$ の方向に一致させることにより、1次PMDの効果を補償することができる。これに対し、2次PMDベクトル $\Omega T'$ の影響は、PMD補償装置10と伝送路との間のモード結合によって新たに発生する2次PMDベクトル $\Omega A'$ と合わさって残存することになる。この2次PMDベクトル $\Omega A'$ は、伝送路の1次PMDベクトル $\Omega T$ と1次PMDベクトル $\Omega C$ との相対角度に基づいて方向及び長さが定まるので、調整することはできない。

図9 Bは、固定PMD付与部102に基づく2次PMDの補償原理を説明する図である。図9 Bに示すように、固定PMD付与部102には、固定の1次PMDベクトル $\Omega C$ に加えて固定の2次PMDベクトル $\Omega C'$ の成分を備えているとする。このとき、図9 Bにおける1次PMDベクトル $\Omega C$ を軸として回転させた場合、1次PMDの補償状態には影響を与えることなく、1次PMDベクトル $\Omega C$ と垂直な面内において2次PMDベクトル $\Omega C'$ の方向を自在に調整することが可能となる。この場合、 $\Omega T' + \Omega A' + \Omega C'$ を最小化するように調整を行うか、あるいは光信号の劣化を最小に抑えるように調整を行うことができるので、固定PMD付与部102において2次PMD成分の抑圧が可能となる。

次に、上述のような固定の2次PMD成分を備えたPMD付与部102の具体例を図10に示す。PMD付与部102は、複数の直線複屈折媒質を固有偏光軸に相対角度をつけて連結させることにより構成することができる。図10の例では、直線複屈折媒質102a、102b、102c…を所定の相対角度で順次連結する場合を示している。直線複屈折媒質としては、例えば、偏波保持ファイバ(PMF : Polarization Maintaining Fiber)を用いるか、あるいは

ルチル結晶などの１軸性複屈折結晶を用いることができる。

PMFを用いてPMD付与部１０２を構成する場合は、融着接続器を使用し、相対角度をつけてPMFの所定の接続箇所を融着すればよい。また、１軸性複屈折結晶を用いてPMD付与部１０２を構成する場合は、コリメータを用いてファイバからの出力光を一旦平行ビームに変換し、結晶光学軸に相対角度をつけて配置した結晶を透過させることにより実現することができる。

PMD付与部１０２により１次PMDベクトルに直交する２次PMD成分のみを発生させる場合には、２段構成の直線複屈折媒質を用いれば十分である。この場合、各々の直線複屈折媒質のDGDをそれぞれ $\tau_1$ 、 $\tau_2$ とし、その相対角度を $\theta$ とすると、PMD付与部１０２における１次PMD量（DGD）、及び２次PMD量（SOPMD）は、次式のように表すことができる。

$$\langle \text{DGD} \rangle = (\tau_1^2 + \tau_2^2 + 2\tau_1\tau_2\cos 2\theta)^{1/2} \quad [\text{ps}]$$

$$\langle \text{SOPMD} \rangle = \tau_1\tau_2\sin 2\theta \quad [\text{ps}^2]$$

上式で表されるDGD及びSOPMDは、本実施形態に係るPMD補償装置１０を適用する伝送路に適合するように選択可能である。具体的には、DGD及びSOPMDの確率密度分布に基づき統計的に最良に振舞う最適値を選択し、DGD及びSOPMDがその最適値となるように、 $\tau_1$ 、 $\tau_2$ 、 $\theta$ を様々な値に定めることができる。

次に図１１は、本発明を適用した第２の実施形態に係るPMD補償装置２０の構成を示す図である。上述したように第１の実施形態においては、固定の２次PMDベクトル $\Omega C'$ は、固定の１次PMDベクトル $\Omega C$ の垂直な面内で調整を行う構成であるのに対し、第２の実施形態では調整の自由度をより高くできる構成を採用する。具体的には図１１に示すように、第１偏波コントローラ２０１と、固定DGD付与部２０２と、第２偏波コントローラ２０３と、固定SOPMD付与部２０４と、受信器２０５と、モニタ部２０６と、制御回路２０７とを含んで第２の実施形態に係るPMD補償装置２０が構成されている。

図 1 1 に示す PMD 補償装置 2 0 においては、第 1 の実施形態と同様の伝送路を経由して入射した光信号に対し、第 1 偏波コントローラ 2 0 1 による偏光変換制御が施された後、固定 DGD 付与部 2 0 2 に導かれる。この固定 DGD 付与部 2 0 2 は、固定の 1 次 PMD の成分のみを備えた素子であり、本発明の第 1 の固定 PMD 付与部として機能する。

そして、固定 DGD 付与部 2 0 2 から出力された光信号に対し、第 2 偏波コントローラ 2 0 3 による偏光変換制御が施された後、固定 SOPMD 付与部 2 0 4 に導かれる。この固定 SOPMD 付与部 2 0 4 は、固定の 2 次 PMD の成分のみを備えた素子であり、本発明の第 2 の固定 PMD 付与部として機能する。なお、PMD 補償装置 2 0 の受信器 2 0 5 及びモニタ部 2 0 6 は、第 1 の実施形態の場合と同様の機能を持つ。

このような構成により、第 2 の実施形態に係る PMD 補償装置 2 0 は、固定の 1 次 PMD ベクトルに制約されることなく、固定の 2 次 PMD ベクトルを所望の方向に向けることが可能となる。よって、PMD 補償装置 2 0 による 2 次 PMD の抑圧効果を高めることができる。

次に、第 2 の実施形態において、上述の固定 DGD 付与部 2 0 2 及び固定 SOPMD 付与部 2 0 4 の具体的な構成例を図 1 2 及び図 1 3 を用いて説明する。まず、固定 DGD 付与部 2 0 2 は、単一の PMF 又は 1 軸性複屈折結晶を用いて構成することができる。一方、固定 SOPMD 付与部 2 0 4 は、第 1 の実施形態の図 1 0 に示す構成と同様にして多段の PMF 又は 1 軸性複屈折結晶を用いて構成することができる。固定 SOPMD 付与部 2 0 4 の最小の構成としては、3 つの PMF 又は 1 軸性複屈折結晶を用いればよいが、上述したような固有偏光軸に相対角度をつけて連結させるだけでは、SOPMD を残したままの状態では全体の DGD を 0 にすることができない。

そこで、固定SOPMD付与部204の構成として、図12又は図13に示すように、3つのPMF又は1軸性複屈折結晶等である素子204a～204fを連結させた場合のいずれかの連結部に、固定の偏光変換器204gを配置することにより、全体のDGDを0にする場合を示す。固定の偏光変換器204gは、光学位相素子を組み合わせて所定の偏光変換機能を持たせることにより実現することができる。

図12は、1段目の素子204a、2段目の素子204b、固定の偏光変換器204g、3段目の素子204cの順で配置した固定SOPMD付与部204の例を示している。また、図13は、1段目の素子204d、2段目の素子204e、固定の偏光変換器204g、3段目の素子204fの順で配置した固定SOPMD付与部204の例を示している。いずれの構成においても、図12及び図13に各々のPMDベクトルを示すように、固定SOPMD付与部204に作用に基づき全体のDGDを打ち消すことができる。

なお、上述の固定SOPMD付与部204において、大きな温度変動が発生した場合、各々のPMFや1軸性複屈折結晶内において2つの固有偏光モード間の位相揺らぎが引き起こされることにより、1次PMDベクトル及び2次PMDベクトルの方向が揺らぐことがある。従って、このような温度変動の影響を軽減するためには、温度調整装置（温度調整手段）によって固定PMD付与部204の温度を一定に保つ必要がある。

また、本発明の変形例として、図14に示すようにPMD補償装置30を構成してもよい。図14に示す変形例は、偏波コントローラ301と、固定PMD付与部302と、偏波コントローラ303と、偏光子（又は偏光分離素子）304と、受信器305と、モニタ部306と、制御回路306とを含んでPMD補償装置30が構成されている。本変形例においては、1つの偏波コントローラ303及び1つの偏光子（又は偏光分離素子）304が2次PMD抑圧部として機能し、これを後段に配置することにより組み合わせることが可能となり、

さらに2次PMDの補償効果を高めることができる。モニタ部は、偏光分離素子からの光強度をモニタするようにしても良い。

以上説明した本発明は、上記の実施形態に限定されることなく、様々な変更が可能である。例えば、第1の実施形態における固定PMD 102、第2の実施形態における固定DGD付与部202、固定SOPMD付与部204を構成する部材と組み合わせ方法は、同様の機能を持たせることができれば自在に選択することができる。

更に、ここまでに説明した発明形態は、基本となる1次PMD補償器（1つの固定の群遅延時間差(Differential Group Delay: DGD)付与部と、1つの偏波コントローラ(Polarization Controller: PC)を備えた簡易PMD補償装置(PMD Compensator: PMDC)、特に、偏光度(Degree Of Polarization: DOP)モニタを備えた上記簡易PMD C(参考文献[4] (F. Roy et al., OFC' 99, TuS4-1, p275, 1999)) ) に対して、簡潔に2次PMDの抑圧効果を付加したものである。その基本となる簡易PMD C部の適用される伝送路に対する最適DGDについて説明する。

PMDベクトルの概念を用いると、このPMD Cは主偏光(Principal State of Polarization: P S P)伝送として機能する。すなわち、PMD Cを含めた伝送路全体のP S P (PMDベクトルの方向)を入力信号光の偏光状態(State Of Polarization: S O P)の方向に向かせることで補償している。従って、全体のPMDベクトルを入射信号光の取りうるあらゆるS O Pの方向に向かせるためには、PMD CのDGD付与部は伝送路のDGD以上のDGD量を持たなければならない(参考文献[4])。しかし、2次PMDを考慮すると、伝送路の統計分布により取り得るDGDの最大値は必ずしもPMD CのDGD付与部の最適DGD量とはならない。

PMD Cおよび光通信システムについての本発明は、以下のように構成され



ている。すなわち、(1)最適DGD量を持ったDGD付与部を備えたPMDC、(2)光通信システムに該PMDCを適用する方法、(3)最適DGD量を持ったDGD付与部を備えたPMDCの適用された光通信システム。

図15A、図15B、図15Cは本発明における光通信システムを示したものである。例えば、入力信号はNRZ、40Gbps、 $2^7$ の擬似ランダムビットパターンであり、波長1550nm、消光比13dBとすることができる。2次PMDCは入力信号SOPとシステム全体のPSPとの間の関係によって変化するので、入射信号SOPをスクランブルする。光伝送路のモデルは参考文献[1] (F. Bruyere, Optical fiber Tech., 2, pp269-280, 1996) のモデルに従っており、伝送路のジョーンズマトリクスをDGDの周波数依存性を加味した位相シフト行列と、PSPの周波数依存性を加味した回転行列によって構成している。前者は1次PMDであるDGDと2次PMDの一部である偏波依存波長分散 (Polarization-dependent Chromatic Dispersion: PCD) の成分を含み、後者は2次PMDの一部であるPSPの周波数依存性を含んでいる。簡易PMDCは1つのPCと1つのDGD付与部、さらにDOPモニタを備え、図15Bに示されているように動作する。具体的にはPCは最大のDOPとなるように偏光変換を行う。レシーバは参考文献[7] (S.D. Personick, Bell Syst. Technol. J., 52(6), pp. 843-886, 1973) に記載の基本的なモデルに従っている。ここに示すシミュレーションでは光ノイズと、伝送路の透過率を無視している。

まず伝送路にはDGDのみを想定する。DGDが0~25psの分布を持つとき、幾つかの異なるDGD量を持たせた上記PMDCによって補償されたQ値を全ての入射SOPに対して計算した。図16A、図16Bは伝送路のDGD量( $\tau_L$ )についてのDOPとQ値を、PMDCのDGD付与部の様々なDGD量( $\tau_C$ )に対して計算した結果である。ただし、DOPとQ値は共に入射SOPに対しての最小値を示している。

Q値の変化の傾向は、DOPのそれとよく一致しており、DOPがPMDによる伝送劣化ペナルティを正しく示していることが分かる。 $\tau_C$ 、 $\tau_L$ がそれぞれ25ps、12.5psであるとき、Q値が大きく劣化しているが、これは2次PMDの影響である。DOPのグラフにも同じ傾向が見られることから、DOPが2次PMDの影響もモニタできることが分かる。2次PMDはこの場合 $\tau_C$ 、 $\tau_L$ の大きさに比例して増加するが(参考文献8)(N. Gisin et al., Optics Communications, 89, pp.316-323, 1992)、 $\tau_C = \tau_L$ の場合には、各々の固有偏光軸を直交させることで1次、2次PMD共に0となるのでQ値は劣化しない。もちろん $\tau_C$ が小さ過ぎれば、 $\tau_L$ を補償しきれないためQ値は劣化する。

最悪のQ値が最大となる最適の $\tau_C$ はおよそ18.75psであり、これはDGDの分布を0~25psとし、その最大値を $T=25ps$ と置けば、0.75T程度であることが分かる。また、同様に図16Bの横軸を0~20psとして、20ps以上を無視した場合でも最適な $\tau_C$ は15.625ps付近であり、 $T=20ps$ で0.75Tが15psであるから同じようにあてはまることが分かる。

次に、2次PMDを加えた場合の計算を行った。2次PMDの値は2乗平均平方根値(root mean square: rms)を代表値として選んだ。仮にDGDが0~25psの分布を示す場合、その伝送路の平均DGDはおよそ10psとなる。従って、2次PMDの2つの成分であるPSP回転とDGD周波数微分 $\tau_\omega$ のrms値はそれぞれ、7.2ps、22.7psとなる(参考文献[9])(L. E. Nelson et al., Photon. Technol. Lett., 11(12), p1614, 1999)。図7はこのKおよび $\tau_\omega$ を伝送路に与えて図16の場合と同様に $\tau_L$ に対して $\tau_C$ が様々な値を持つ場合の補償されたQ値の計算結果である。 $\tau_L$ が大きい時、図16Bと比べるとKおよび $\tau_\omega$ の影響でQ値があまり補償されていないが、最適なDGD値 $\tau_C$ はやはり18.75ps付近であることが分かる。もしDGD分布の幅がより小さくなれば、Kおよび $\tau_\omega$ も同じように小さくなる。従って、2次PMDの値が小さくなるとDGDのみ場合(図16B)の傾向がより顕著になることを考えると、簡易PMDCの最適DGD量はいかなる場合でもおよそ0.75Tとなることが分かる。

この結果は、2次PMDを抑圧した本発明に係る複数の実施形態にも同様にできようすることができる。

この結果を実際の光通信システムに適用する場合、まずシステムの伝送路(光ファイバ)の統計的なPMD特性を測定しなければならない。そして、そのDGD分布から最大DGD値を決定する。その結果に従って、PMDCにインストールされるべきDGDの最適値を前記の定義(最大DGDの0.75)に従って決定する。

以上本発明において、1次PMDおよび2次PMDの存在する伝送路におけるDGD分布の最大値の0.75をPMDCにインストールするDGD付与部のDGD値と定義した。そして、その最適DGD値の決定方法を示した。本発明によれば、簡易で安価なPMDCを光通信システムに最適に適用することができる。

#### 産業上の利用可能性

以上の説明で明らかなように、本発明の偏波モード分散補償装置は、制御量を検出するための構成が単純であって応答速度が速く安価であるとともに、1次偏波モード分散のみならず2次偏波モード分散も補償できる。

また、本発明の偏波モード分散補償方法によれば、制御量の検出が容易であって応答速度が速く、また、1次偏波モード分散のみならず2次偏波モード分散も補償できる。

更に、本発明によれば、構成が簡単で制御が容易な偏波モード分散補償装置を実現できるとともに、1次PMDのみならず2次PMDに対する抑圧効果が高い偏波モード分散補償装置を提供することができる。

また、本発明によれば、光伝送路に対して固定DGD付与部を有するすべての偏波モード分散補償装置を最適に適用することができる。

## 請求の範囲

1. 光伝送路を伝搬してきた光に偏光変換を施す第1の偏波コントローラ及び前記第1の偏波コントローラによって偏光変換された光に群遅延時間差(DGD)を付与する群遅延時間差(DGD)付与部を含み、前記光伝送路の伝搬過程で前記光に付与された偏波モード分散を補償するための補償部と、

前記補償された光に、その偏光状態が一の直線偏光となるように偏光変換を施す第2の偏波コントローラと、

前記第2の偏波コントローラによって偏光変換が施された光を、前記一の直線偏光及びこの一の直線偏光に直交する他の直線偏光に分離する偏光分離部と、

前記分離された他の直線偏光の強度を測定する光強度測定部と、

前記測定された他の直線偏光の強度を最小化するように前記補償部及び前記第2の偏波コントローラを制御する制御部とを備えたことを特徴とする偏波モード分散補償装置。

2. 前記群遅延時間差(DGD)付与部に、光伝送路の偏波モード分散の確率密度分布に基づき統計的に最良に振舞うDGD最適値を選択して、前記最適値を前記群遅延時間差として付与する、請求項1に記載の偏波モード分散補償部およびそれを用いた偏波モード分散補償装置。

3. 前記最適値がDGD確率密度分布の最大値の75%である、請求項2に記載の偏波モード分散補償部およびそれを用いた偏波モード分散補償装置。

4. 光伝送路を伝搬してきた光に偏光変換を施してから群遅延時間差(DGD)を付与して、前記光伝送路の伝搬過程で前記光に付与された偏波モード分散を補償する補償工程と、

前記補償工程にて補償された光に、その偏光状態が一の直線偏光となるように偏光変換を施す偏光変換工程と、

前記偏光変換工程にて偏光変換が施された光を、前記一の直線偏光及びこの一の直線偏光に直交する他の直線偏光に分離する偏光分離工程と、

前記偏光分離工程にて分離された他の直線偏光の強度を測定する測定工程と、

前記測定工程にて測定された他の直線偏光の強度を最小化するように前記補

償工程及び前記偏光変換工程を制御する制御工程とを備えたことを特徴とする偏波モード分散補償方法。

5. 光伝送路の偏波モード分散の確率密度分布に基づき統計的に最良に振舞うDGD最適値を選択して、前記最適値を前記群遅延時間差として付与する、請求項4に記載の偏波モード分散補償工程およびそれを用いた偏波モード分散補償方法。

6. 前記最適値がDGD確率密度分布の最大値の75%である、請求項5に記載の偏波モード分散補償工程およびそれを用いた偏波モード分散補償方法。

7. 伝送路を伝搬する光信号に発生する偏波モード分散を補償する偏波モード分散補償装置であって、

前記伝送路を経由して入射された光信号に偏光変換を施す偏波コントローラと、

前記偏波コントローラによって偏光変換された光信号に固定量のPMD（偏波モード分散）を付与する固定PMD付与部と、

前記固定PMD付与部から出力された光信号の状態を監視するモニタ手段と、  
前記モニタ手段からのフィードバック信号に基づき前記偏波コントローラを制御する制御手段と、

を備え、前記固定PMD付与部が付与する前記固定量のPMDは、固定の1次PMDと固定の2次PMDとからなることを特徴とする偏波モード分散補償装置。

8. 前記固定PMD付与部は、固有偏光軸に相対角度をつけて連結した複数の偏波保持光ファイバ又は1軸性複屈折結晶からなることを特徴とする請求項7に記載の偏波モード分散補償装置。

9. 伝送路を伝搬する光信号に発生する偏波モード分散を補償する偏波モード分散補償装置であって、

前記伝送路を経由して入射された光信号に偏光変換を施す第1の偏波コントローラと、

前記第1の偏波コントローラによって偏光変換された光信号に固定の1次PMDのみを付与する第1の固定PMD付与部と、

前記第 1 の固定 PMD 付与部から出力された光信号に偏光変換を施す第 2 の偏波コントローラと、

前記第 2 の偏波コントローラによって偏光変換された光信号に固定の 2 次 PMD のみを付与する第 2 の固定 PMD 付与部と、

前記第 2 の固定 PMD 付与部から出力された光信号の状態を監視するモニタ手段と、

前記モニタ手段からのフィードバック信号に基づき前記第 1 の偏波コントローラ及び前記第 2 の偏波コントローラを制御する制御手段と、

を備えることを特徴とする偏波モード分散補償装置。

10. 前記第 1 の固定 PMD 付与部は、1 つの偏波保持光ファイバ又は 1 軸性複屈折結晶からなることを特徴とする請求項 9 に記載の偏波モード分散補償装置。

11. 前記第 2 の固定 PMD 付与部は、固有偏光軸に相対角度をつけて連結した 3 つ以上の偏波保持光ファイバ又は 1 軸性複屈折結晶からなることを特徴とする請求項 9 に記載の偏波モード分散補償装置。

12. 前記第 2 の固定 PMD 付与部の連結部のいずれかに固定の偏光変換器を配置し、当該偏光変換器に前記第 2 の固定 PMD 付与部の 1 次 PMD を 0 とするような偏光変換機能を持たせたことを特徴とする請求項 11 に記載の偏波モード分散補償装置。

13. 前記第 1 の固定 PMD 付与部又は前記第 2 の固定 PMD 付与部の温度を調整する温度調整手段を更に備えることを特徴とする請求項 7 又は請求項 9 に記載の偏波モード分散補償装置。

14. 1 つの偏波コントローラと 1 つの偏光子又は偏光分離素子からなる 2 次 PMD 抑圧部を後段に配置したことを特徴とする請求項 7 又は請求項 9 に記載の偏波モード分散補償装置。

15. 光伝送路の偏波モード分散の確率密度分布に基づき統計的に最良に振舞う、最適な固定の 1 次および 2 次 PMD をもつ固定 PMD 付与部を備えた請求項 7、9、または 14 に記載の偏波モード分散補償装置。

16. 請求項 2、5、または 15 に記載の偏波モード分散補償装置を備えた光

通信システム。

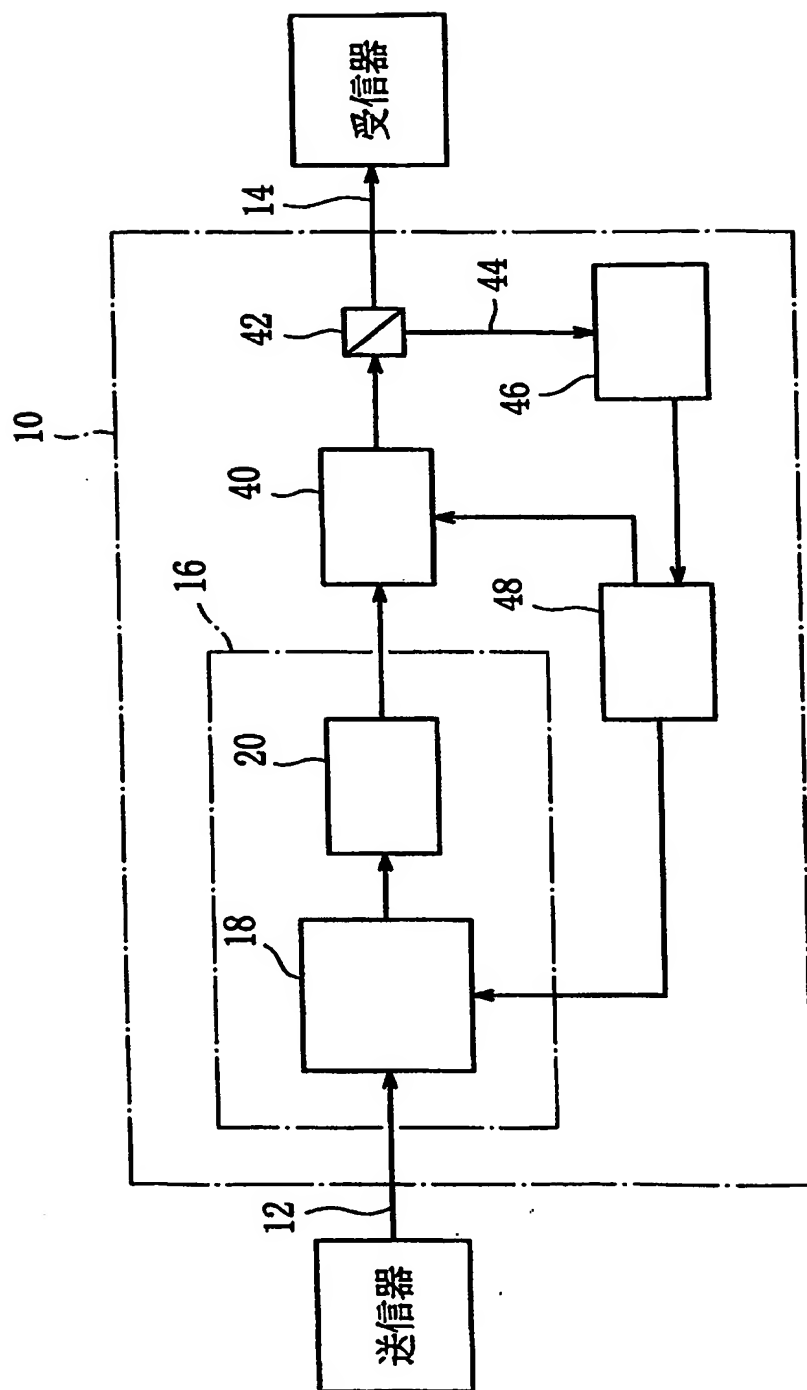


図1



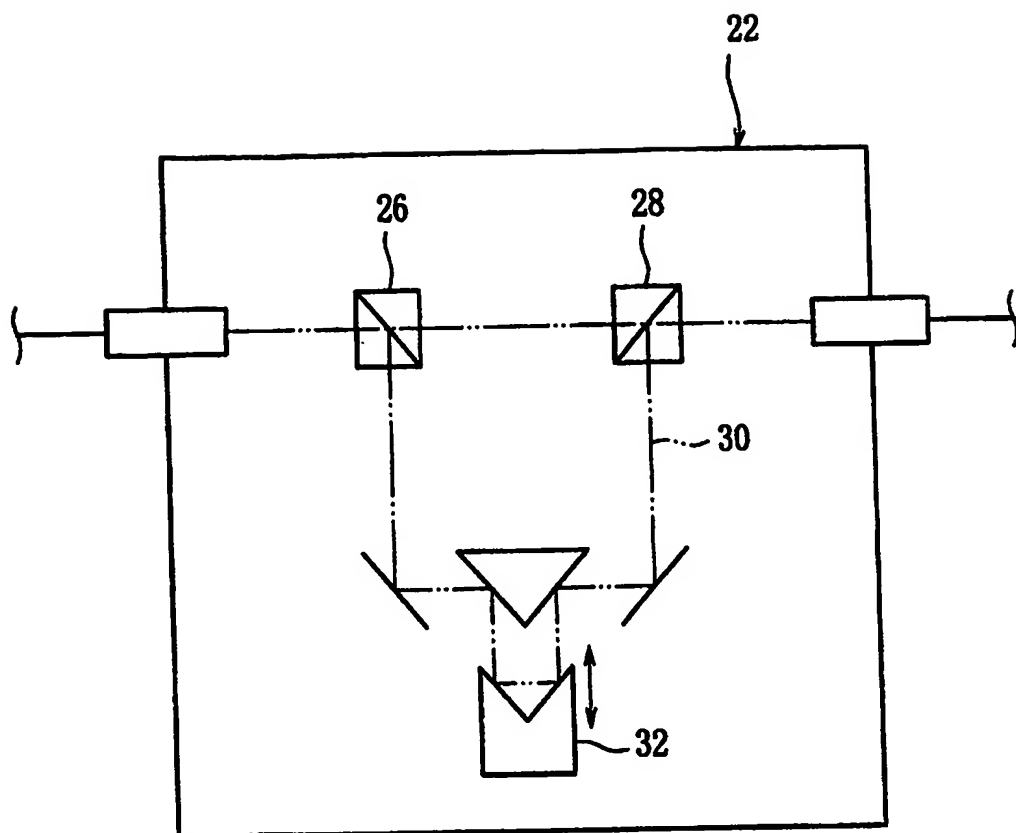


図2

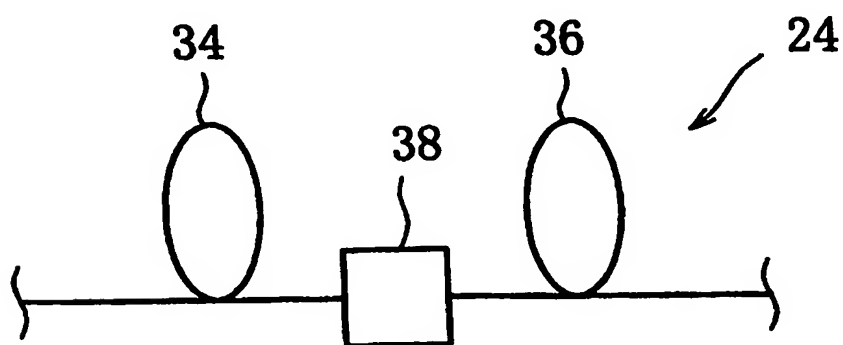
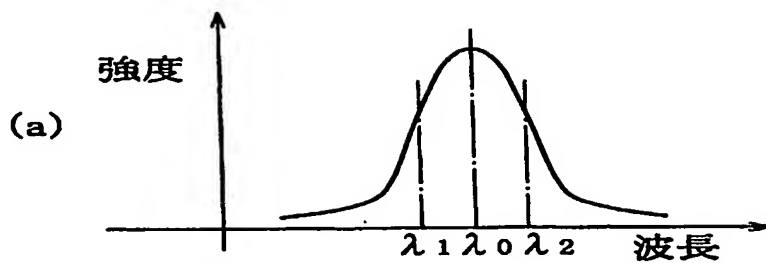


図3

図4



(b)  $\lambda_0$ での偏光状態



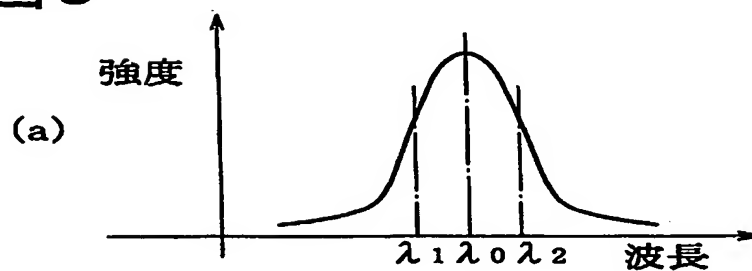
(c)  $\lambda_1$ での偏光状態



(d)  $\lambda_2$ での偏光状態



図5



(b)  $\lambda_0$ での偏光状態



(c)  $\lambda_1$ での偏光状態



(d)  $\lambda_2$ での偏光状態



図6

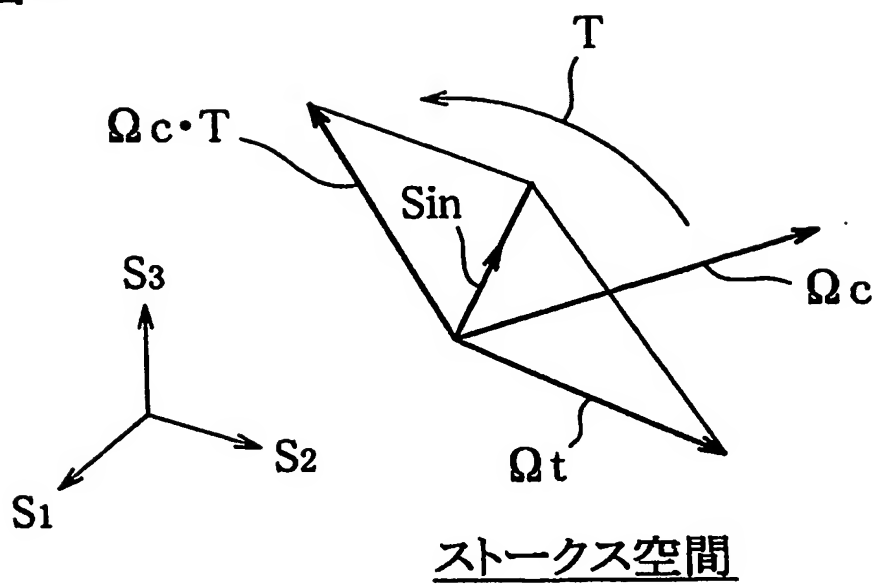
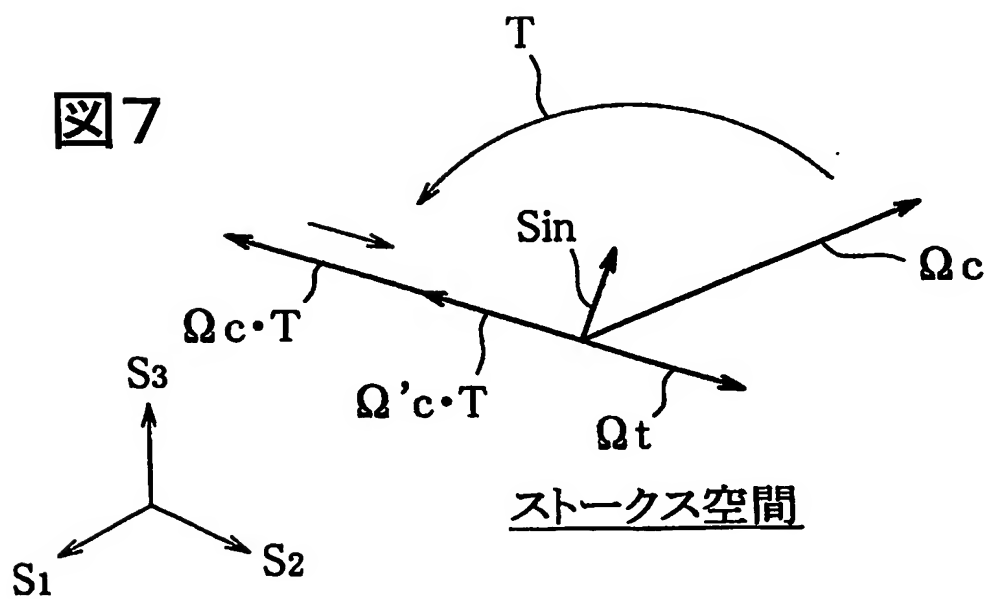


図7



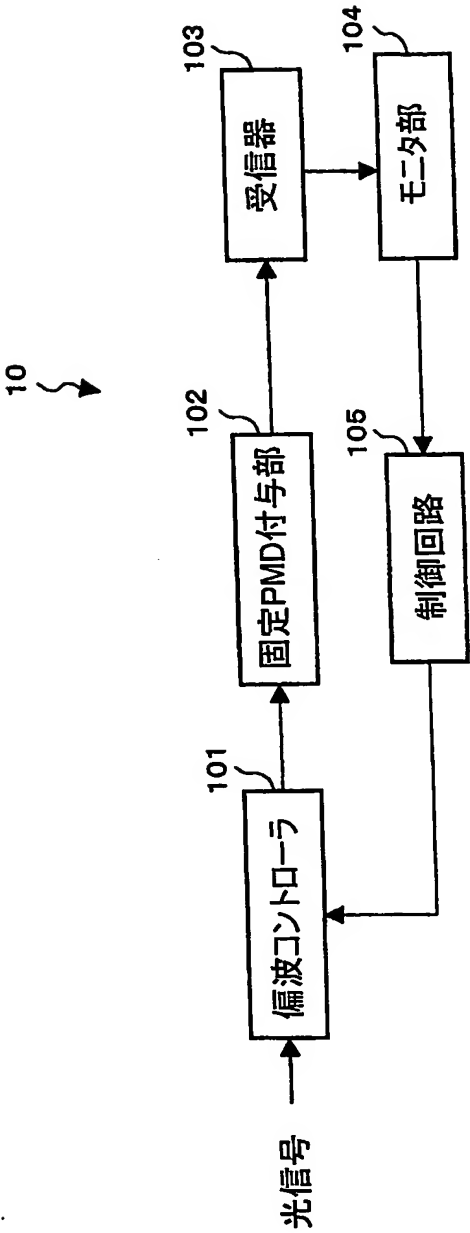


図8

図9A

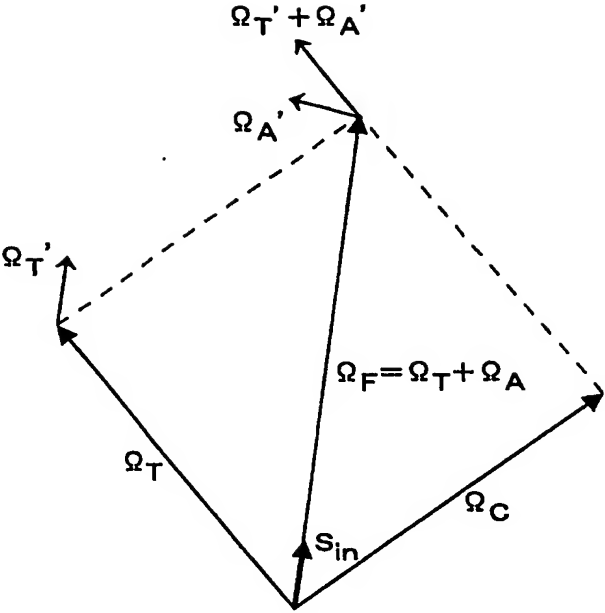
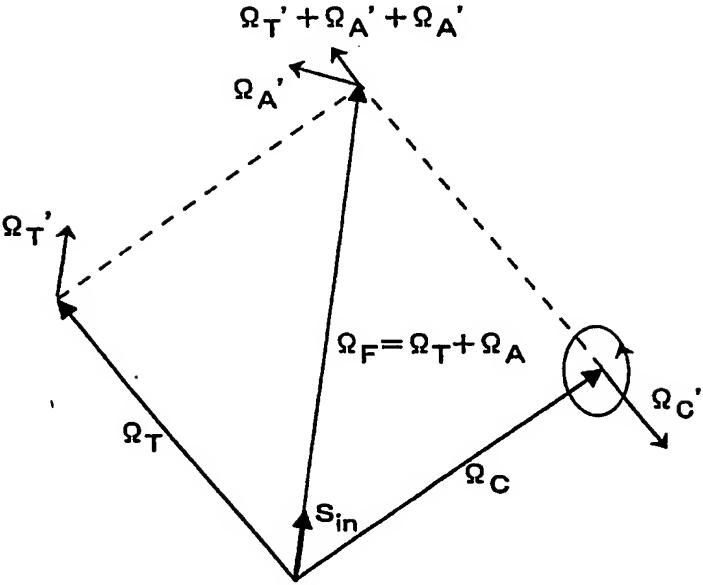


図9B



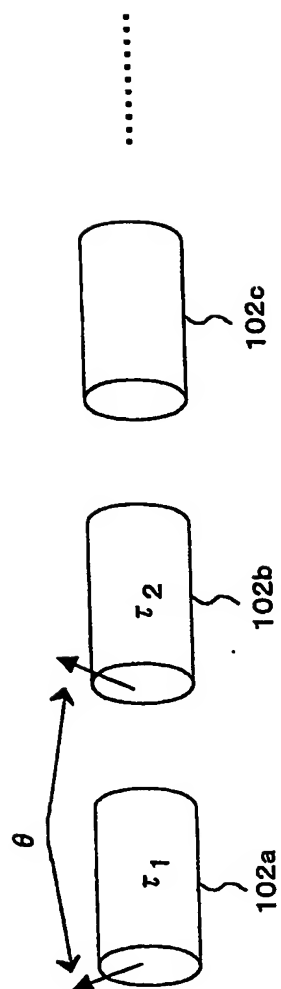


図 10

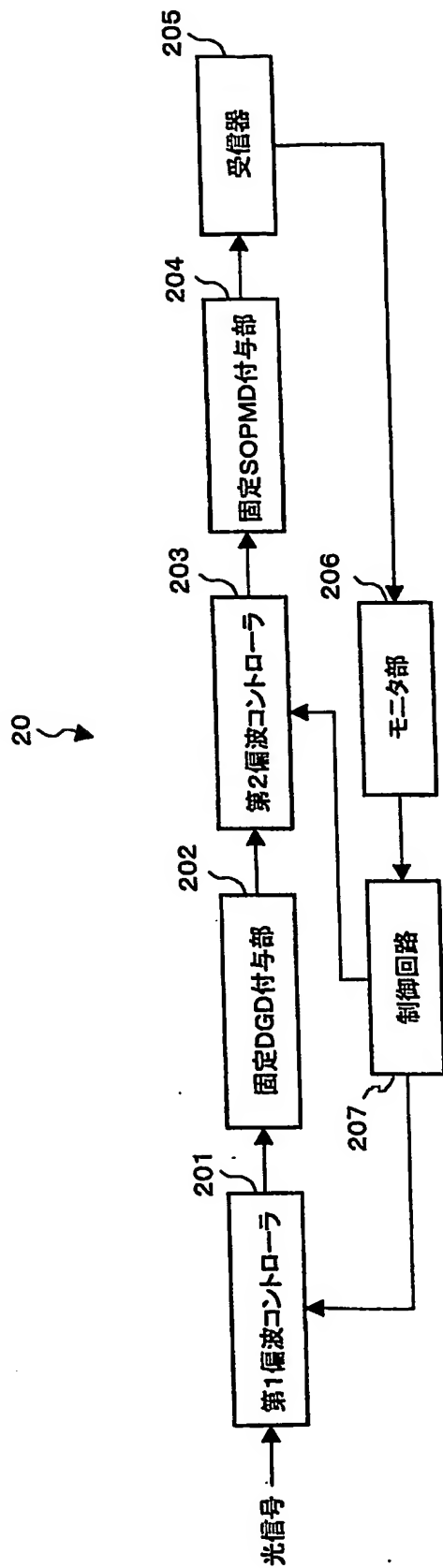


図11

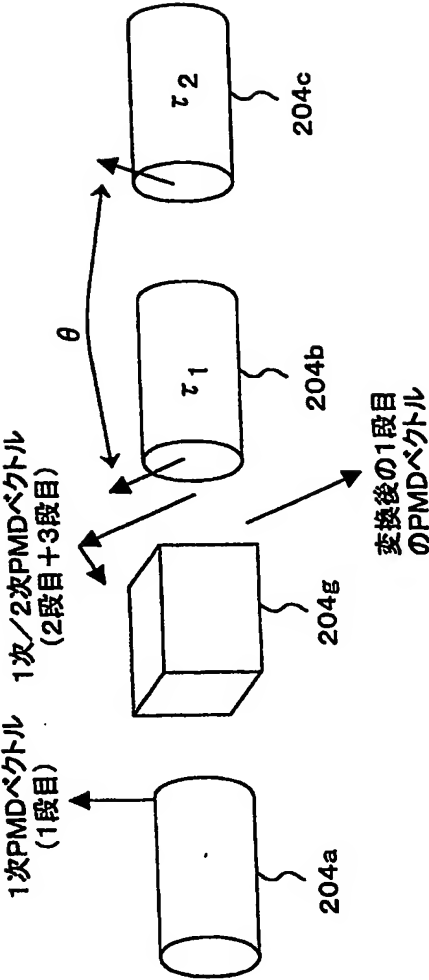
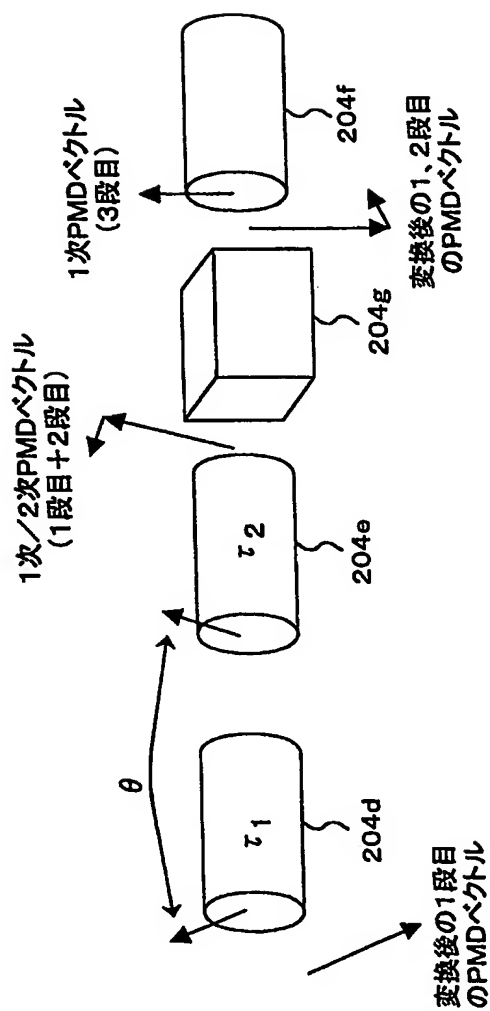


図12





13

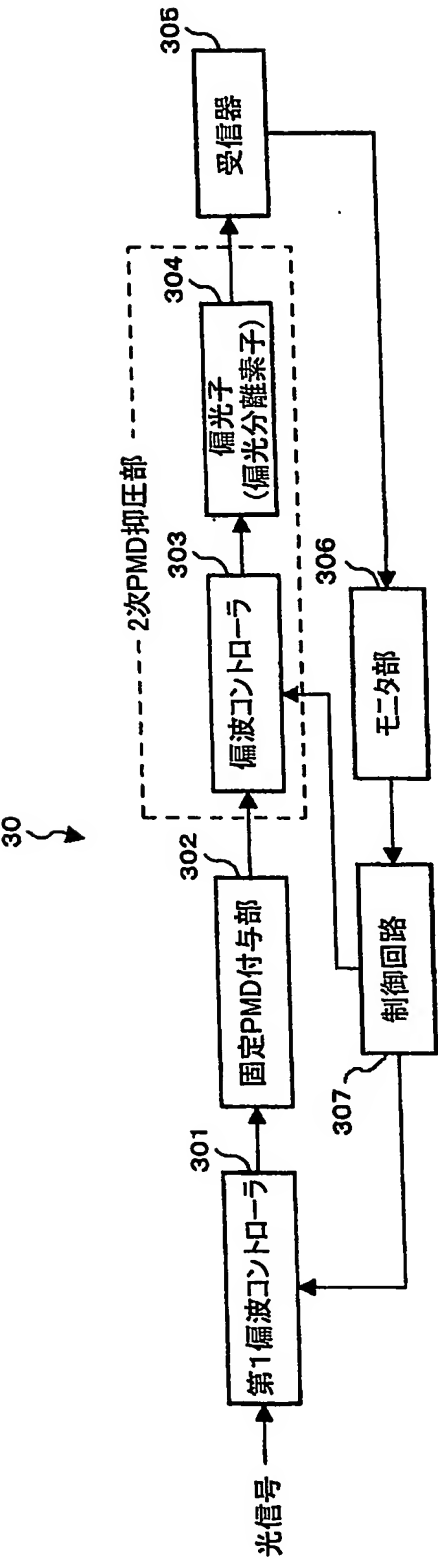


図14

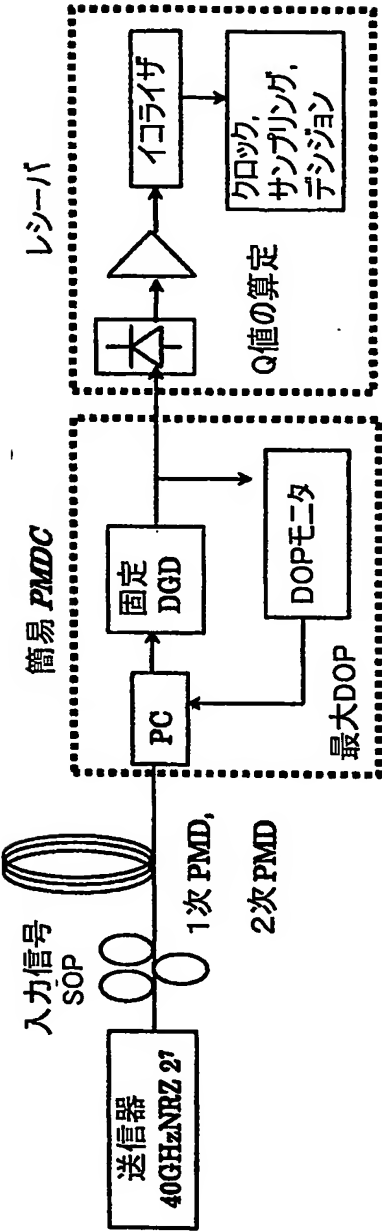


図15A

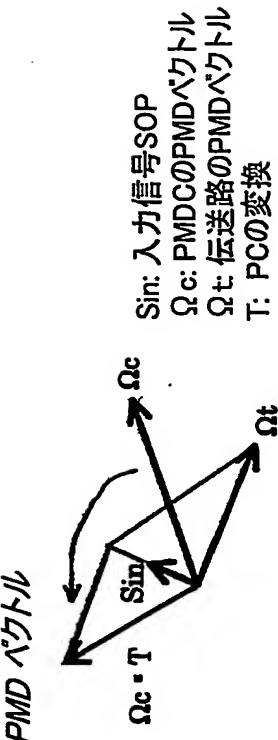


図15B

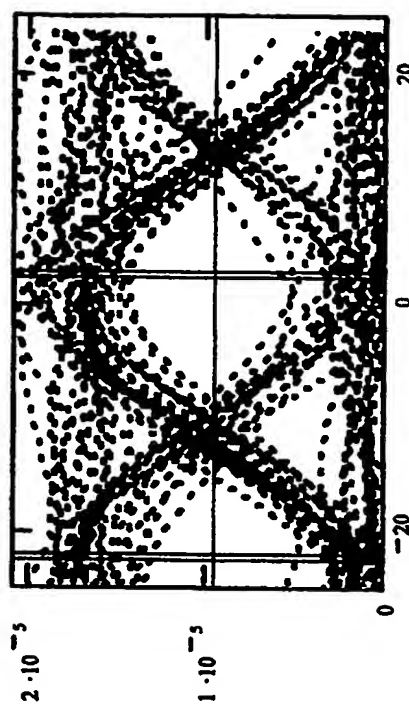


図15C

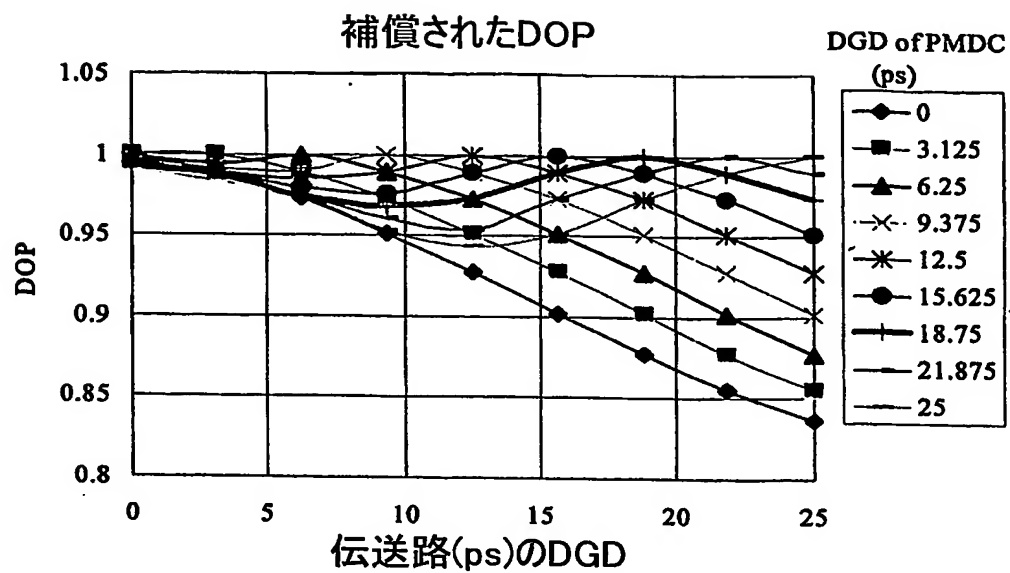


図16A

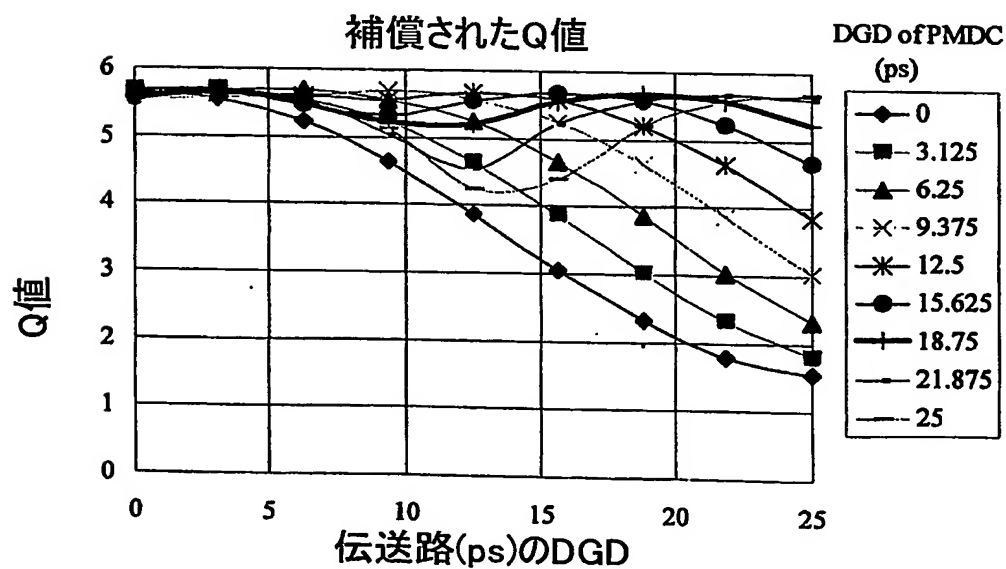


図16B

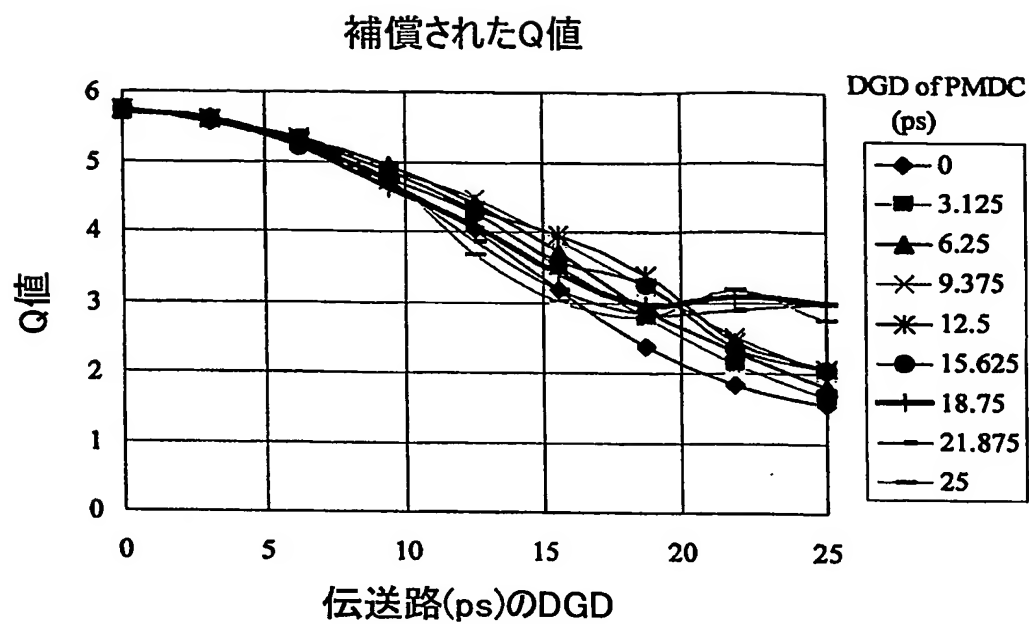


図17

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.  
PCT/JP03/09803

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl<sup>7</sup> H04B10/18

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)  
Int.Cl<sup>7</sup> H04B10/00-10/18, H04J14/00-14/08

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched  
Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2003  
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2003 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2003

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2000-356760 A (KDD Kabushiki Kaisha), 26 December, 2000 (26.12.00), Full text; all drawings (Family: none)	1-6
A	JP 2001-136125 A (Mitsubishi Electric Corp.), 18 May, 2001 (18.05.01), Full text; all drawings & EP 1100217 A	1-6
A	JP 2002-16548 A (Mitsubishi Electric Corp.), 18 January, 2002 (18.01.02), Full text; all drawings (Family: none)	1-6

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>"E" earlier document but published on or after the international filing date</p> <p>"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)</p> <p>"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p>	<p>"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention</p> <p>"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone</p> <p>"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art</p> <p>"&amp;" document member of the same patent family</p>
--	---

Date of the actual completion of the international search  
27 October, 2003 (27.10.03)

Date of mailing of the international search report  
11 November, 2003 (11.11.03)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP03/09803

## Box I Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 2 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. ☐ Claims Nos.:  
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:
2. ☐ Claims Nos.:  
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:
3. ☐ Claims Nos.:  
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

## Box II Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 3 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

Claims 1-6 are directed to a polarization mode dispersion compensator characterized in that a polarization controller is feedback-controlled so that the intensity of a linearly polarized light is minimized.

Claims 7, 8 are directed to a polarization mode dispersion compensator characterized in that the compensator has a PMD imparting unit and a polarization controller is feedback-controlled on the basis of the state of an optical signal so that the primary and secondary PMDs are compensated.

Claims 9-16 are directed to a polarization mode dispersion compensator  
(Continued to extra sheet.)

1. ☐ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2. ☐ As all searchable claims could be searched without effort justifying an additional fee, this Authority did not invite payment of any additional fee.
3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:
4. ☒ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.: 1-6

Remark on Protest ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest.  
☐ No protest accompanied the payment of additional search fees.

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP03/09803

Continuation of Box No. II of continuation of first sheet (1)

having two PMD imparting units, i.e., a primary PMD imparting unit and a secondary PMD imparting unit and the primary and the secondary PMDs are compensated by the PMD imparting units, respectively.



## A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl<sup>7</sup> H04B10/18

## B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl<sup>7</sup> H04B10/00-10/18, H04J14/00-14/08

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1922-1996年

日本国公開実用新案公報 1971-2003年

日本国実用新案登録公報 1996-2003年

日本国登録実用新案公報 1994-2003年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

## C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	J P 2000-356760 A (ケイディディ株式会社) 2000. 12. 26, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-6
A	J P 2001-136125 A (三菱電機株式会社) 2001. 05. 18, 全文, 全図 & E P 1100217 A	1-6
A	J P 2002-16548 A (三菱電機株式会社) 2002. 01. 18, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-6

☐ C欄の続きにも文献が列举されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)

「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&amp;」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

27. 10. 03

国際調査報告の発送日

11.11.03

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

遠山 敬彦

5 J

9855

電話番号 03-3581-1101 内線 3535

## 第I欄 請求の範囲の一部の調査ができないときの意見 (第1ページの2の続き)

法第8条第3項 (PCT 17条(2)(a)) の規定により、この国際調査報告は次の理由により請求の範囲の一部について作成しなかった。

1. ☐ 請求の範囲 \_\_\_\_\_ は、この国際調査機関が調査をすることを要しない対象に係るものである。つまり、
2. ☐ 請求の範囲 \_\_\_\_\_ は、有意義な国際調査をすることができる程度まで所定の要件を満たしていない国際出願の部分に係るものである。つまり、
3. ☐ 請求の範囲 \_\_\_\_\_ は、従属請求の範囲であってPCT規則6.4(a)の第2文及び第3文の規定に従って記載されていない。

## 第II欄 発明の単一性が欠如しているときの意見 (第1ページの3の続き)

次に述べるようにこの国際出願に二以上の発明があるところの国際調査機関は認めた。

請求の範囲1-6は、直線偏光の強度を最小化するように偏波コントローラをフィードバック制御することを特徴とする偏波モード分散補償装置である。

請求の範囲7, 8は、1つのPMD付与部を有し、1, 2次PMDを補償するよう光信号の状態に基づき偏波コントローラをフィードバック制御することを特徴とする偏波モード分散補償装置である。

請求の範囲9-16は、1次PMD付与部と2次PMD付与部の2つのPMD付与部を有し、各々のPMD付与部で1次PMD、2次PMDを補償する偏波モード分散補償装置である。

1. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料をすべて期間内に納付したので、この国際調査報告は、すべての調査可能な請求の範囲について作成した。
2. ☐ 追加調査手数料を要求するまでもなく、すべての調査可能な請求の範囲について調査することができたので、追加調査手数料の納付を求めなかった。
3. ☐ 出願人が必要な追加調査手数料を一部のみしか期間内に納付しなかったため、この国際調査報告は、手数料の納付のあった次の請求の範囲のみについて作成した。
4. ☒ 出願人が必要な追加調査手数料を期間内に納付しなかったため、この国際調査報告は、請求の範囲の最初に記載されている発明に係る次の請求の範囲について作成した。  
請求の範囲1-6

## 追加調査手数料の異議の申立てに関する注意

- ☐ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがあった。
- ☐ 追加調査手数料の納付と共に出願人から異議申立てがなかった。